

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОКА РАЗРЯДА НА ВЫХОД ФАЗЫ  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

М. И. Гуков, И. И. Шаненков, А. И. Циммерман

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.А. Сивков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [1q1@t-sk.ru](mailto:1q1@t-sk.ru)

**IMPACT OF DISCHARGE CURRENT ON YIELD OF  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PHASE**

M.I. Gukov, I.I. Shanenkov, A.I. Tsimmerman

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Sivkov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [1q1@t-sk.ru](mailto:1q1@t-sk.ru)

***Abstract.** In this paper we investigate the impact of rate of discharge current rise on the final yield of  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase content in the plasma dynamic synthesis product. It was found that the rate of discharge current rise directly influence the final product composition. The higher rate of current rise leads to the formation of the product with higher concentration of epsilon phase.*

**Введение.** Особенность оксида железа (III) заключается в полиморфизме, который проявляется в четырех модификациях, обладающих различными физическими свойствами:  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\beta$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Актуальной задачей является синтез порошков с высоким содержанием эpsilon фазы оксида железа (III) в связи с тем, что частицы этой фазы обладают исключительными магнитными свойствами. Одними из таких свойств являются ферромагнитный резонанс в терагерцовом диапазоне, а также самое высокое значение коэрцитивной силы среди всех известных оксидов металлов, что может оказаться полезным для создания на их основе современных постоянных магнитов, применяющихся для хранения информации и другой электроники. Также частицы эpsilon фазы оксида железа нетоксичны и обладают высокой стойкостью к коррозии [1, 2]. В данной работе рассматривается влияние изменения скорости нарастания тока электроразрядной плазменной струи на выход фазы  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при плазмодинамическом методе синтеза в системе, основанной на коаксиальном магнитоплазменном ускорителе (КМПУ), разработанном в НИ ТПУ [3]. Данный метод обладает следующими преимуществами (высокая скорость протекания реакции, низкие энергозатраты, высокие достигаемые энергетические параметры в процессе синтеза и высокая скорость охлаждения). Ранее также было показано, что с помощью данного метода возможно синтезировать продукт с достаточно высоким содержанием эpsilon фазы оксида железа (III) [4].

**Экспериментальная часть.** Для оценки влияния зависимости скорости нарастания тока на содержание фазы  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в конечном продукте была проведена серия экспериментов по получению порошкообразного оксида железа при различных энергетических параметрах системы (таблица 1). Скорость нарастания тока регулировалась путем изменения значения  $U_{зар}$  (при увеличении зарядного напряжения системы происходит увеличение нарастания электроразрядного тока, формирующего плазменную струю). Стоит отметить, что значение  $C_{зар}$  было выбрано одинаковым, чтобы время

протекания процессов не изменялось в широких пределах. Регистрация импульсного электроразрядного тока осуществлялась путем прямого измерения сигнала при помощи трансформатора тока (катушки Роговского), который располагался непосредственно в цепи разряда.

Таблица 1

Исходные экспериментальные данные и результаты рентгено-фазового анализа

Эксперимент №	Среда / $P_0$ , атм.	$U_{зар}$ , кВ	$C_{зар}$ , мФ	$t_{имп}$ , с	$di/dt$ , А/с	Фазовый состав, масс. %		
						$\epsilon$ - $Fe_2O_3$	$Fe_3O_4$	$\alpha$ - $Fe_2O_3$
1	$O_2 / 1,0$	2,50	14,4	400	1,94	16,3	68,7	15,0
2	$O_2 / 1,0$	2,75	14,4	395	2,02	28,0	53,3	18,7
3	$O_2 / 1,0$	3,00	14,4	450	2,20	53,0	26,5	20,5

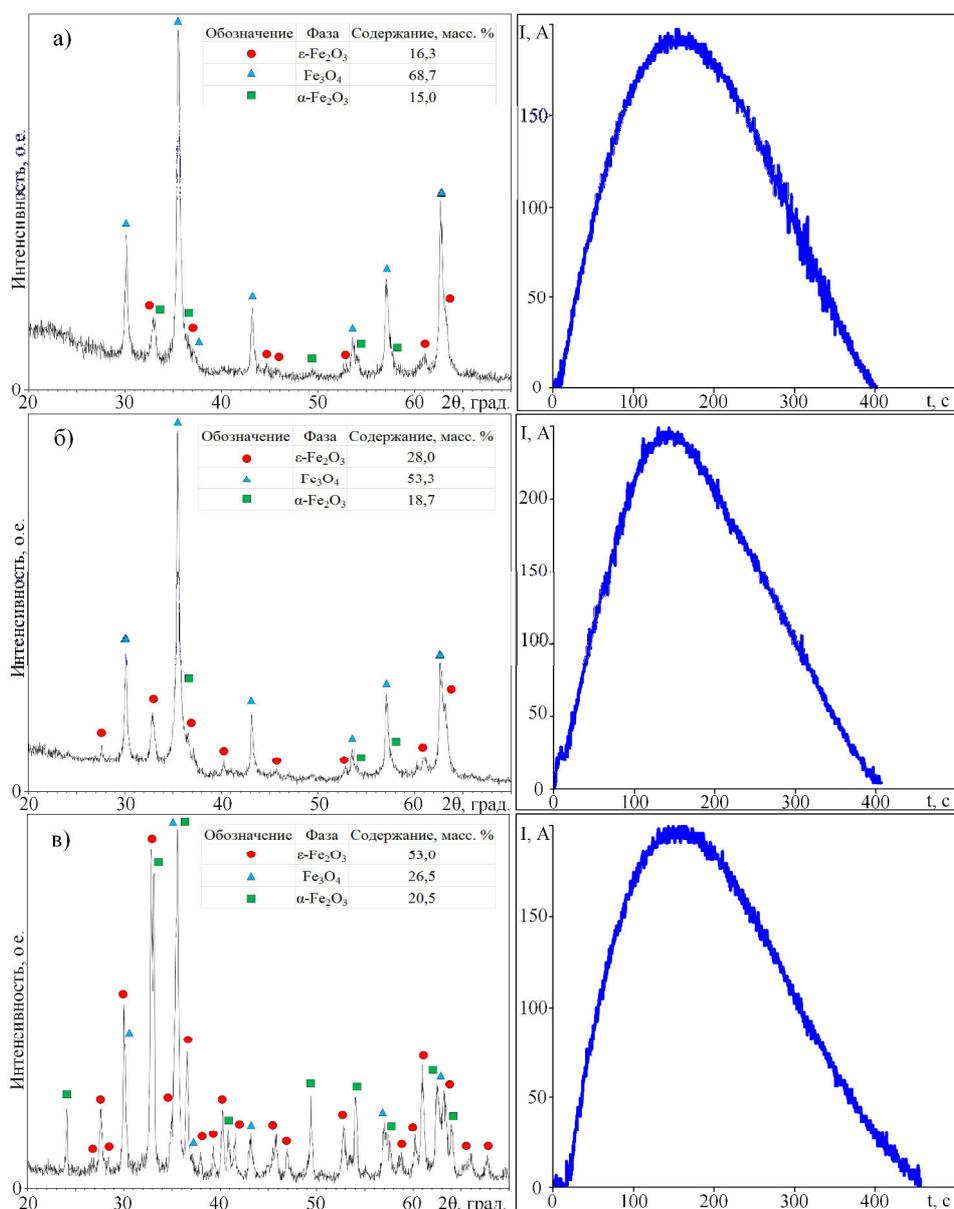


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы полученных порошков и зарегистрированные осциллограммы токов: а) эксп. №1; б) эксп. №2; в) эксп. №3

**Результаты.** В результате проведения данной серии экспериментов были получены порошкообразные образцы, которые без предварительной обработки исследовались методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S. Оценка количественно-фазового состава проводилась с помощью полученных рентгеновских дифрактограмм в программной среде «PowderCell 2.4» с использованием базы данных PDF 2+. Обработка полученных данных позволила установить, что с увеличением скорости энерговода в систему, характеризующее увеличение скорости нарастания тока, происходит заметный рост содержания эpsilon фазы (табл. 1). Увеличение скорости энерговода непосредственно влияет на увеличение скорости плазменного потока, что приводит к возрастанию скорости распыления материала и к увеличению вероятности образования эpsilon фазы оксида железа (III), которая, как известно, может существовать только при размере частиц менее 200 нм.

На рентгеновских дифрактограммах (рисунок 1) полученных образцов отчетливо видно, что с увеличением скорости нарастания происходит значительное увеличение интенсивности пиков эpsilon фазы оксида железа (III), одновременно со значительным снижением интенсивности пиков и следов  $Fe_3O_4$ . Кроме этого наблюдается незначительный рост максимумов фазы гематита. Результаты количественно-фазового анализа состава образцов позволили установить, что при увеличении скорости нарастания тока содержание эpsilon фазы в конечном продукте можно поднять практически в три раза.

С целью получения еще более высокого значения скорости ввода энергии был проведен дополнительный эксперимент при величине зарядного напряжения 3,5 кВ. Ожидаемое увеличение скорости энерговода привело к выходу из строя электродной системы плазменного ускорителя из-за возросших динамических воздействий на основные узлы конструкции и загрязнению конечного продукта.

**Заключение.** Таким образом, согласно результатам серии проведенных экспериментов, можно утверждать, что увеличение скорости нарастания тока электроразрядной плазменной струи (от 1,94 А/с до 2,2 А/с) при плазмодинамическом методе синтеза в системе, основанной на КМПУ, приводит к увеличению содержания эpsilon фазы оксида железа (III) (от 16,3 % до 53 %) в синтезированном порошке. При этом, установлено, что величина скорости энерговода в систему ограничивается величиной механической прочности узлов КМПУ к динамическим воздействиям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gich M. Magnetolectric coupling in  $\epsilon$ - $Fe_2O_3$  nanoparticles [Electronic version] // Nanotechnology – 2006. – Vol. 17. P. 687–691.
2. Tucek J., Zboril R., Namai A., Ohkoshi S. An advanced nanomaterial exhibiting giant coercive field, millimeter-wave ferromagnetic resonance, and magnetolectric coupling [Electronic version] // Chemistry of Materials. – 2010. – Vol. 22. – P. 6483–6505.
3. Пат. 137443 РФ. МПК7 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова. Заявлено 24.09.2013; Оpubл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 6с.
4. Sivkov A., Naiden E., Ivashutenko A., Shanenkov Plasma dynamic synthesis and obtaining ultrafine powders of iron oxides with high content of  $\epsilon$ - $Fe_2O_3$  [Electronic version] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 405. – P. 158–168.